

МЕТОД РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ДИФФУЗИОННЫХ И СМЕШАННЫХ ГАЗОВЫХ ФАКЕЛОВ В ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧАХ НА ОСНОВЕ ОТНОСИТЕЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Аннотация

Предложен метод расчета характеристик газовых факелов, который приближенно на основе принципа относительного моделирования учитывает закономерности массопереноса в факеле и позволяет эффективно определять длину и динамику выгорания (тепловыделения) диффузионных и смешанных факелов в условиях промышленных печей. Метод может быть использован в зональных расчетах сложного теплообмена в промышленных печах.

Ключевые слова: газовые факела, промышленные печи, горелки, условия сжигания, диффузионное горение, относительное моделирование.

Abstract

The calculational method of gaseous flames characteristics are proposed. It in base of relatively modeling principle approximately take into account mechanisms of mass transfer in flame and allow effectively to determine length and burn out (heat release) dynamics of diffusional and combined flames in industrial furnace conditions. The method may be used in zonal calculation of radiative-convective heat transfer in industrial furnaces.

Keywords: gaseous flames, industrial furnace, burners, burning conditions, diffusional combustion, relatively modeling.

Сжигание газа в длинных диффузионных и диффузионно-кинетических (смешанных) факелах является одним из основных теплотехнических принципов, реализуемых в промышленных печах для обеспечения равномерности теплоподвода в рабочей камере. Для расчетного анализа детальных характеристик сложного теплообмена в рабочей камере пламенных печей в инженерной практике применяются различные модификации численного зонального метода [1]. Зональный метод предполагает использование исходных данных по длине и динамике выгорания топлива (тепловыделения) в факеле, которые, как правило, задаются на основе экспериментальных данных и их обобщений. Однако эмпирический подход к описанию характеристик факелов в промышленных печах не является эффективным из-за сложности физических процессов, многообразия горелочных устройств и условий сжигания топлива. Поэтому актуальной является разработка достаточно простых в математическом отношении, но в то же время эффективных и универсальных методов расчета факелов для использования в качестве замыкающих соотношений для задач сложного теплообмена в печах.

В данной работе предложен метод расчета характеристик диффузионных и смешанных газовых факелов в промышленных печах с различными видами горелок, приближенно учитывающий закономерности диффузионных процессов в спутных потоках горючего и окислителя и только уточняемый по экспериментальным данным. Это делает метод достаточно общим и универсальным.

Метод расчета использует подход [2, 3], когда за основу берутся длина и кривая выгорания свободного диффузионного газового факела (вне печи) при тех же значениях гидродинамических критериев Fr и Ar и вводятся поправочные функции, каждая из которых учитывает одно из дополнительных условий, определяющих процесс факельного горения в промышленных печах.

В отличие от хорошо известного подхода [2, 3], в развиваемом нами методе поправочные функции получаются не эмпирическим, а аналитическим путем на основе уравнения массопереноса и принципа относительного моделирования. При этом метод использует гидродинамические характеристики турбулентных струй, а точнее их отношение для факела, развивающегося внутри топочной камеры печи, и свободного факела. Последнее важно, поскольку эти относительные характеристики слабо изменяются по длине расчетного внутрипечного факела и могут служить характеристиками факельного процесса в целом, что значительно упрощает задачу без существенной потери точности.

Основными условиями факельного процесса, которые должны быть одинаковыми как внутри печи, так и во вне, являются: состав топливного газа; расход и скорость истечения газа через горелочное сопло. При этом предполагается, что свободный факел развивается в неограниченной среде окислителя (воздуха).

Анализ процессов факельного сжигания газообразного топлива в промышленных печах с различными видами горелок позволил установить следующие дополнительные условия горения и соответствующие им поправочные функции f_x : 1) стесненность факела, $f_{огр}$; 2) соотношение моментов движения спутных потоков горючего и окислителя, f_m ; 3) крутка и дополнительная турбулизация факела за счет установки в горелках завихрителей, f_{Ω} ; 4) настильность факела, f_w ; 5) частичное предварительное смешение горючего газа с воздухом, $f_{см}$.

Дополнительные условия горения и соответствующие им функции 1–4 учитывают граничные условия развития диффузионного факела, функция 5 учитывает начальные условия. Если какое-либо из дополнительных условий развития факела отсутствует, то соответствующая поправочная функция $f_x=1$.

В отличие от диффузионного смешанный факел, образующийся при частичном предварительном смешении топливного газа с воздухом, имеет два фронта горения – кинетический (короткий, расположенный вблизи среза горелочного сопла) и диффузионный (длинный, в котором происходит догорание топлива). Поэтому горение на основном участке смешанного факела $x > L_{нач}$ по сути является диффузионным с меньшей концентрацией горючего и окислителя в спутных газовых струях и интенсивным тепловыделением на начальном участке за счет горения в кинетическом фронте.

В соответствии с развиваемым подходом длина произвольного факела в условиях промышленной печи выразится в виде

$$L_{\phi} = L_{св.ф} \cdot f_{огр} \cdot f_m \cdot f_{\Omega} \cdot f_w \cdot f_{см} . \quad (1)$$

Длина свободного диффузионного факела $L_{св.ф}$ имеет достаточно простое выражение. Экспериментально установлено, что длина диффузионного факела пропорциональна его стехиометрической длине $L_{сх}$, на которой подсасывается теоретически необходимое количество воздуха, и приведенному критерию Фруда Fr_{ϕ} или Архимеда Ar_{ϕ} (при воздействии массовых сил на формирование факела) и может быть вычислена по формуле [3]:

$$\frac{L_{св.ф}}{d_{\Gamma}} = C Ar_{\phi}^{0,17} \left(\frac{L_{сх}}{d_{\Gamma}} \right)^{0,59} , \quad (2)$$

$$Ar_{\phi} = 3,3 \frac{u_{\Gamma}^2 \rho_{\Gamma}^0}{g d_{\Gamma} \rho_c} = 3,3 Fr_{\phi} \frac{\rho_{\Gamma}^0}{\rho_c} , \quad (3)$$

где C – константа, для аксиального факела равная $C=1,74$; d_{Γ} – диаметр сопла горелки, в случае некруглого сечения – эквивалентный диаметр; u_{Γ} – скорость истечения газа из сопла горелки; g – ускорение свободного падения; ρ_{Γ}^0 , ρ_c^0 – начальные плотности горючего газа и среды, в которую он истекает.

Стехиометрическая длина факела определяется по известной формуле [2]:

$$\frac{L_{cx}}{d_{\Gamma}} = 5,7 \sqrt{\left[1 + \frac{0,63(\theta - 1)}{\theta \rho V_0 + 1}\right] \frac{\psi}{\theta}} \times (1 + \theta \rho V_0), \quad (4)$$

где $\theta_{\rho} = \rho_{\text{в}}^0 / \rho_{\Gamma}^0$; $\theta = \theta_{\rho} (273 + t_{\Gamma}^0) / (273 + t_{\text{в}}^0)$; $\psi = 2,8$;

V_0 – теоретический объем воздуха на горение; ρ_{Γ}^0 , $\rho_{\text{в}}^0$ и t_{Γ}^0 , $t_{\text{в}}^0$ – начальные плотности и температуры газа и воздуха.

Вид поправочных функций в выражении (1) найдем исходя из теоретических представлений о процессе массопереноса в турбулентном диффузионном факеле.

Количество газа, кг/с, полностью сгорающего в свободном диффузионном и ограниченном внутрипечном факелах, одинаково при одинаковом расходе газа через горелки по условию задачи, т.е.

$$M_{\Gamma} = \text{const}. \quad (5)$$

Это же количество газа, кг/с, диффундирует из струи к фронту горения

$$M_{\Gamma} = \frac{D}{\delta_{\Phi}} \Delta c F_{\Phi} = \frac{D}{\delta_{\Phi}} c_f L_{\Phi} \Pi_{\Phi}, \quad (6)$$

где D – коэффициент диффузии; δ_{Φ} – характерная толщина зоны массопереноса в факеле, для коаксиального факела $\delta_{\Phi} = d_{\Phi}/2$; $\Delta c = c_f$ – средняя разность концентраций компонента в струе c_f и во фронте горения $c_{\text{фр}} = 0$; $F_{\Phi} = L_{\Phi} \Pi_{\Phi}$ – площадь поверхности фронта горения; Π_{Φ} – характерный периметр фронта горения.

Тогда на основании (5), (6) можно записать выражение для относительной длины факела, которая в случае учета только одного из дополнительных условий горения представляет собой поправочную функцию $f_x = f_{\text{огр}}, f_m, f_{\Omega}, f_w, f_{\text{см}}$:

$$f_x = \frac{L_{\Phi}}{L_{\text{св.}\Phi}} = \frac{D_{\Phi}}{D_{\text{св.}\Phi}} \cdot \frac{\delta_{\text{св.}\Phi}}{\delta_{\Phi}} \cdot \frac{c_{\Phi}}{c_{\text{св.}\Phi}} \cdot \frac{\Pi_{\Phi}}{\Pi_{\text{св.}\Phi}}. \quad (7)$$

Коэффициент диффузии в поперечном направлении факела определяется турбулентной составляющей, которая пропорциональна турбулентной вязкости

$$D_{\Phi} \approx \varepsilon_{\text{T}}. \quad (8)$$

Согласно полуэмпирической теории турбулентности Прандтля

$$\varepsilon_{\text{T}} = l^2 (du/dy) \text{ или в среднем } \varepsilon_{\text{T}} = l_{\text{ср}}^2 (du/dy)_{\text{max}}, \quad (9)$$

где ε_{T} – турбулентная вязкость; l и $l_{\text{ср}}$ – длины пути турбулентного смешения – локальная и средняя; du/dy и $(du/dy)_{\text{max}}$ – градиенты скорости в поперечном направлении потока – локальный и максимальный.

На основании (8), (9) выражение (7) можно переписать в виде

$$f_x = \frac{L_{\Phi}}{L_{\text{св.}\Phi}} = \left(\frac{l_{\Phi}}{l_{\text{св.}\Phi}} \right)_{\text{ср}}^2 \cdot \frac{(du/dy)_{\text{max}\Phi}}{(du/dy)_{\text{max}\text{св.}\Phi}} \cdot \frac{\delta_{\text{св.}\Phi}}{\delta_{\Phi}} \cdot \frac{c_{\Phi}}{c_{\text{св.}\Phi}} \cdot \frac{\Pi_{\Phi}}{\Pi_{\text{св.}\Phi}}. \quad (10)$$

В формуле (10) относительные параметры, которые не могут быть определены однозначно, берутся как характерные или средние величины для основного участка факелов.

Последняя формула представляет собой общее выражение для поправочной функции $f_x = f_{\text{огр}}, f_m, f_{\Omega}, f_w, f_{\text{см}}$, которое конкретизируется для каждого случая путем учета относительного изменения определяющих параметров факельного процесса, входящих в (10), на основе теории турбулентных струй [4, 5] и уточняется по экспериментальным данным путем

введения корреляционных коэффициентов. Проведенные предварительные оценки показывают хорошее качественное совпадение теоретических результатов и экспериментальных данных, полученных на огневых стендах [6].

При определении динамики выгорания (тепловыделения) газового факела используется качественная схожесть кривых изменения химического недожога топлива вдоль диффузионных факелов при различных условиях сжигания, а также предположение о приближенной автомодельности факельных процессов на основном участке факела $x > L_{\text{нач}}$. В качестве нормирующего выступает параметр, являющийся производным от общей длины факела $L_{\text{ф}}$, рассмотренной ранее.

Выгорание топлива в i -ом сечении факела χ_i оценивается по величине химического недожога топлива q_{3i} и связано с ним простым выражением

$$\chi_i = 1 - q_{3i} \quad (11)$$

Распределение среднего в сечении химического недожога вдоль диффузионного факела промышленной горелки может быть определено по формуле [6]

$$\frac{q_3}{q_{03}} = \exp \left[-7.41 \left(\frac{x + L_{\text{нач}}}{L_{\text{ф}}} \right)^{2.73} \right], \quad (12)$$

где q_3 и q_{03} – средний химический недожог топлива в рассматриваемом сечении факела с координатой x и на срезе горелки; $L_{\text{нач}}$ – длина начального участка факела.

Тепловыделение между двумя сечениями факела i и $i+1$ рассчитывается по формуле

$$Q_{i,i+1} = G_{\text{г}} Q_{\text{н}}^{\text{р}} (\chi_{i+1} - \chi_i), \quad (13)$$

где $G_{\text{г}}$ – расход газа через горелку, кг/с;

Таким образом, предложен метод расчета характеристик газовых факелов, который на основе принципа относительного моделирования учитывает закономерности массопереноса в факеле, являясь при этом достаточно простым в математическом отношении. Метод позволяет эффективно определять длину и динамику выгорания (тепловыделения) диффузионных и смешанных факелов в промышленных печах, отличающихся значительным многообразием горелочных устройств и условий сжигания. Метод определения характеристик газовых факелов может быть использован в зональных расчетах сложного теплообмена в промышленных печах.

Список использованных источников

1. Блох А.Г. Теплообмен излучением / А.Г. Блох, Ю.А. Журавлев, Л.Н. Рыжков. – М: Энергоатомиздат, 1991. – 432 с.
2. Лисиенко В.Г. Усовершенствование методов сжигания природного газа в сталеплавильных печах / В.Г. Лисиенко, Б.И. Китаев, Н.И. Кокарев. – М.: Металлургия, 1977. – 280 с.
3. Лисиенко В.Г. Расчет длины турбулентного газового факела с использованием закономерностей аэродинамики неравновесной свободной струи / В.Г. Лисиенко, В.М. Седелкин, Л.И. Шibaева // Известия ВУЗов. Черная металлургия. 1979, №12. С. 122–125.
4. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй / Г.Н. Абрамович. – М.: Физматгиз, 1960. – 720 с.
5. Турбулентное смешение газовых струй / Г.Н. Абрамович, С.Ю. Крашенинников, А.Н. Секундов, И.П. Смирнова; под ред. Г.Н. Абрамовича. – М.: Наука. 1974. – 272 с.
6. Седелкин В.М. Исследование и разработка методов расчета теплообмена в трубчатых печах газовой и нефтехимической промышленности: дис. докт. техн. наук / В.М. Седелкин. Саратов, 1982. 577 с.